昆 虫 学 报 *Acta Entomologica Sinica*，December 2003，46（6）：697－704 ISSN 0454-6296

转基因抗虫水稻 MSA 和 MSB 对非靶标害虫褐飞虱和白背飞虱的影响

傅 强[1]，王 锋[2]，李冬虎[1,3]，姚 青[1]，赖凤香[1]，张志涛[1]
（1. 中国水稻研究所水稻生物学国家重点实验室，杭州 310006；2. 福建农业科学院，福州 350003；3. 扬州大学，江苏扬州 213007）

摘要：本文报道了转 *SCK* + *cry1Ac* 双基因抗虫水稻 MSA 和 MSB 对非靶标害虫褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 和白背飞虱 *Sogatella fucifera* 生物学及田间发生动态的影响。与亲本明恢 86 相比，MSA 对两种飞虱若虫发育历期、初羽化成虫鲜重、羽化率、短翅率、成虫产卵量、卵受精率、单雌子代数及发育进度等生物学指标均无明显影响，而 MSB 虽然对多数指标影响不明显，但可以引起白背飞虱初羽化雌虫鲜重与短翅率显著下降，还引起褐飞虱初羽化雄虫鲜重明显减轻。在近距离（株间距约 8 cm）寄主选择实验中，褐飞虱对 MSA 和 MSB 无明显选择性，而白背飞虱若虫和成虫均明显趋向两种转基因水稻。田间小区实验表明 MSB 上的稻飞虱（主要为白背飞虱）密度一般低于亲本明恢 86，但差异不显著，提示转基因水稻 MSB 引发非靶标害虫稻飞虱灾变的风险较小。

关键词：转基因水稻；*SCK*；*cry1Ac*；非靶标害虫；褐飞虱；白背飞虱；生态风险
中图分类号：Q968 **文献标识码**：A **文章编号**：0454-6296（2003）06-0697-08

Effects of insect-resistant transgenic rice lines MSA and MSB on non-target pests *Nilaparvata lugens* and *Sogatella fucifera*

FU Qiang[1]，WANG Feng[2]，LI Dong-Hu[1, 3]，YAO Qing[1]，LAI Feng-Xiang[1]，ZHANG Zhi-Tao[1]（1. State Key Lab of Rice Biology，China National Rice Research Institute，Hangzhou 310006，China；2. Fujian Academy of Agricultural Sciences，Fuzhou 350003，China；3. Yangzhou University，Yangzhou，Jiangsu 213007，China）

Abstract: The effects of two insect-resistant transgenic rice lines MSA and MSB，containing both *SCK* and *cy1Ac* genes，on non-target pests *Nilaparvata lugens* and *Sogatella fucifera* were investigated. Compared with the parent line Minghui 86，MSA showed no significant effect on the biological parameter of the non-target insect pests，including nymphal duration，fresh weight of newly emerged adult，emergence rate，brachypterous rate，adult fecundity，rate of eggs fertilized，number of offsprings per female and their development. MSB rice did not markedly influence most of the biological indices of the two species of planthoppers although the fresh weight and brachypterous rate of emerged females of *S. fucifera*，and the weight of emerged males of *N. lugens* decreased significantly. It was observed that *S. fucifera* obviously preferred MSA and MSB to Minghui 86 in host selection behavior in short distance（about 8 cm）while *N. lugens* did not. However，the density of rice planthoppers（mainly *S. fucifera*）in fields was generally lower on MSB than on Minghui 86，although the difference was not significant. These results suggested that the ecological risk of transgenic rice MSB causing the outbreak of rice planthoppers was small.

Key words: Transgenic rice；*SCK*；*cry1Ac*；non-target pests；*Nilaparvata lugens*；*Sogatella fucifera*；ecological risk

二化螟 *Chilo suppressalis*（Walker）、三化螟 *Tryporyza incertulas*（Walker）、大螟 *Sesamia inferens* Walker 和稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée 是我国水稻的主要害虫，尤其 20 世纪 90 年代以来危害不断加剧，上升趋势明显，对化学农药的抗药性问题亦较为突出。以浙江稻区为例，二化螟对杀虫双和三唑磷已产生高抗甚至极高抗药性（蒋学辉等，2001）。寻求安全有效的害虫防治新途径显得日益迫切。利用转基因技术培育优良抗性品种受到国内外的广泛关注。近年来，抗螟虫和稻纵卷叶螟

基金项目：国家 973 项目（001CB109004）；国家 863 项目（2001AA212261）；国家转基因作物产业化专项（J00-C-002）
作者简介：傅强，男，1968 年生，湖南人，博士，副研究员，从事昆虫种型变异、转基因水稻生态安全性评价等方面研究，E-mail：abpi@fy.hz.zj.cn
收稿日期 Received：2003-03-26；接受日期 Accepted：2003-07-01

等鳞翅目害虫的转 *Bt* 基因及 *CpTI*（豇豆胰蛋白酶抑制剂 cowpea typsin inhibitor）基因水稻的培育已成为研究热点（朱祯，2001；Bernal *et al.*，2002），并于 1998 年在我国率先进入田间试验（Cohen *et al.*，2000；Ye *et al.*，2001），但迄今国内外尚未实现商品化生产。

转基因作物的生态安全问题备受关注，是制约其商品化生产的重要因素（Shelton *et al.*，2002）。有关转基因水稻潜在生态风险方面的研究较薄弱正是未能实现商品化生产的主要原因之一，对非靶标害虫的生态安全性评价是其中一项重要的研究内容，目前有关研究仅见于对转 *Bt* 基因水稻的少量报道，且尚限于单从室内测定或田间调查就 *Bt* 水稻对褐飞虱 *Nilaparvata lugens*（Stål）、白背飞虱 *Sogatella furcifera*（Horváth）、黑尾叶蝉 *Nephotettix cincticeps*（Uhler）（Bernal *et al.*，2002；刘志诚等，2002；陈茂等，2003）和稻蓟马 *Trips oryzae* Williams（唐健等，2000）等非靶标害虫影响的研究。有关我国具自主知识产权的另一类重要抗虫基因 *SCK* 的转基因水稻对非靶标害虫影响的研究尚未见报道。

SCK（Signal-CpTI-KDEL）是经修饰的 *CpTI* 基因，两端分别融合了源于大豆 Kunitz 型胰蛋白酶抑制剂（soybean Kunitz trypsin inhibitor，SKTI）的信号（signal）肽序列以及内质网滞留信号（KDEL）序列，其目标表达产物 CpTI 对大部分鳞翅目和部分鞘翅目害虫都有较好的抗虫作用（朱祯，2001）。由中国科学院遗传与发育研究所和福建省农业科学院合作培育的水稻品系 MSA 和 MSB 是一类转 *SCK* + *cry1Ac* 双基因的抗虫水稻，对水稻螟虫和稻纵卷叶螟有很好的控制效果（李冬虎等，待发表）。鉴于褐飞虱和白背飞虱是我国的主要水稻害虫，同时也是 *SCK* 和 *cry1Ac* 基因的非靶标害虫，研究 MSA 和 MSB 对稻飞虱的影响无疑是该类转基因水稻生态安全性评价的关键问题之一，本文采用室内生物学观察与田间种群动态调查相结合的方法，就此进行了较系统的研究，结果总结如下。

1 材料和方法

1.1 供试材料

供试稻飞虱包括褐飞虱 *N. lugens* 和白背飞虱 *S. furcifera* 两种，其中前者为中国水稻研究所饲养的室内 TN1 种群，后者在中国水稻研究所富阳基地田间采集。

供试的转基因抗虫水稻 MSA 和 MSB 品系及其亲本明恢 86（MH86）均由中国科学院遗传与发育研究所和福建省农业科学院提供，其中 MSA 和 MSB 为转 *SCK* + *cry1Ac* 双基因 MH86 的 T6 代稳定材料。MH86 用作实验对照。

1.2 室内试验

1.2.1 对若虫生长发育和成虫繁殖的影响：取健壮无虫的稻苗移栽于泥盆（高 15 cm，直径 16 cm）中，每盆栽同品系水稻分蘖 2～3 个，罩于无虫环境，待稻苗完全存活后，去外部老叶并洗净，备用。

（1）若虫生长发育情况：每盆稻苗接入孵化当日的褐飞虱或白背飞虱若虫 20 头，外罩透明无毒、有透气窗的薄膜笼罩（高 60 cm，直径 15 cm）。待成虫开始羽化后，每日记载羽化成虫数，同时称取单头成虫鲜重（精度为 0.01 mg），并记录其性别和翅型。以每盆为一个重复计算试虫的羽化率、雌虫比例及短翅率，每水稻材料重复 6～9 次。

（2）成虫繁殖情况：每盆稻苗接入羽化当天的褐飞虱或白背飞虱雌、雄成虫 1 对（雌虫翅型一致），罩以笼罩（规格同上）。第 10 天去掉成虫，卵开始孵化后，隔日记载孵化若虫数并随时除去，第 15 天在双筒解剖镜下检查稻苗上剩余的卵量及发育情况，计算产卵量和卵受精率。实验期间，若雌成虫在接虫后 5 天内死亡，则该盆苗弃用，另行补接；若 5 天内雄虫死亡，则补足雄虫。每水稻材料重复 11～12 次。

1.2.2 对子代数量和发育的影响：供试水稻苗的准备同 1.2.1 节，每盆接入褐飞虱或白背飞虱羽化当日的雌、雄成虫 1 对（雌虫翅型一致）。前期每日观察成虫死亡情况，若雌虫接虫后 5 天内死亡，则该盆弃用，另行补接；若 5 天内雄虫死亡，则补足雄虫。接虫后第 25 天（褐飞虱）或第 23 天（白背飞虱）检查每盆稻苗上的试虫数及其发育情况。每水稻材料重复 15 次。

1.2.3 对寄主选择行为的影响：MSA、MSB 和 MH86 稻苗各取其一分蘖（大小相似）成等边三角形移栽于泥盆（高 17 cm，直径 18 cm）中，株距约 8 cm，笼罩防虫，待稻苗存活后洗净、去老叶，备用。

（1）若虫的寄主选择：每盆接入约 40 头褐飞虱或白背飞虱 3 龄若虫，用透明薄膜笼（高 80 cm，直径 17 cm）罩住，每种飞虱分别观察 8 盆约 320 头。每 12 h 记载各水稻苗上的若虫数，连续观察 3

天。

（2）成虫的产卵选择：每盆接入 10 对褐飞虱或白背飞虱初羽化成虫，用透明薄膜笼（规格同上节）罩住，每种飞虱分别接虫 8 盆 80 对。7 天后，剪下稻苗于双筒体视显微镜下检查各稻苗上的卵块数及每块卵粒数。

1.3　对稻飞虱田间种群动态的影响

选转基因水稻 MSB 及其亲本对照 MH86 两种供试水稻材料，处理：MSB 和 MH86 不施药处理，MSB 施药处理（仅用扑虱灵防飞虱）和 MH86 施药处理（用扑虱灵、锐劲特、杀虫双等防治稻飞虱、螟虫和稻纵卷叶螟），分别于 7 月 17 日和 8 月 1 日用药两次。水稻于 5 月 18 日播种，6 月 17 日单本移栽，每小区面积 60 ~ 80 m^2，随机区组设计，重复 3 次。自然感虫，常规田间肥水管理。飞虱数量采用机动吸虫器取样，每小区随机吸取 3 点，每点吸取水稻 6 丛。7 月 24 日开始调查，每周 1 次，除不施杀虫剂的亲本 MH86 在 8 月 21 日后因螟虫、稻纵卷叶螟为害严重而难以调查外，其余处理均调查至 9 月 4 日水稻灌浆期。

1.4　数据分析

数据分析采用唐启义和冯明光（2002）的 DPS 数据分析软件进行，除若、成虫寄主选择数据采用对数线性模型分析法外，其余均采用方差分析和 Duncan 氏新复极差法，其中百分率数据经反正弦平方根转换。

2　结果与分析

2.1　转基因水稻对两种飞虱若虫生长发育的影响

与亲本 MH86 相比，MSA 水稻对两种飞虱若虫发育历期、初羽化成虫鲜重、羽化率、雌虫比例和短翅率等各指标均无明显影响（$P > 0.05$），而 MSB 水稻虽然对多数指标无明显影响，但引起白背飞虱雌虫短翅率显著降低（$P < 0.05$）和初羽化雌虫鲜重极显著下降（$P < 0.01$），还引起褐飞虱初羽化雄虫鲜重明显降低（$P < 0.05$）（表 1）。由此可见，MSA 和 MSB 并不有利于两种飞虱若虫的生长发育，其中 MSB 对两种飞虱，特别是对白背飞虱还表现出一定的抑制作用。

2.2　转基因水稻对两种飞虱成虫繁殖力的影响

两种转基因水稻对褐飞虱和白背飞虱的产卵量、卵块数及卵受精率均无显著影响（$P > 0.05$）（表 2）。

表 1　转基因水稻 MSA 和 MSB 对褐飞虱和白背飞虱生长发育的影响

Table 1　Effects of transgenic rices MSA and MSB on growth and development of *Nilaparvata lugens* and *Sogatella furcifera*

参数 Parameter	褐飞虱 *N. lugens*			白背飞虱 *S. furcifera*		
	MSA	MSB	MH86（CK）	MSA	MSB	MH86（CK）
若虫历期 Nymphal duration（d）						
♀	20.0 ± 0.1 a（n = 50）	19.8 ± 0.1 a（n = 60）	20.0 ± 0.1 a（n = 42）	19.6 ± 0.2 a（n = 63）	19.8 ± 0.1 a（n = 73）	19.7 ± 0.2 a（n = 68）
♂	19.2 ± 0.1 a（n = 38）	19.3 ± 0.1 a（n = 41）	19.2 ± 0.1 a（n = 44）	18.8 ± 0.2 a（n = 57）	19.2 ± 0.2 a（n = 72）	19.2 ± 0.2 a（n = 58）
初羽化成虫鲜重 Fresh weight of newly emerged adults（mg）						
♀	2.638 ± 0.054 a（n = 40）	2.680 ± 0.046 a（n = 58）	2.709 ± 0.070 a（n = 42）	1.725 ± 0.021 a（n = 56）	1.570 ± 0.018 b（n = 67）	1.728 ± 0.028 a（n = 61）
♂	1.363 ± 0.023 ab（n = 36）	1.342 ± 0.016 b（n = 41）	1.407 ± 0.019 a（n = 44）	0.974 ± 0.011 a（n = 47）	0.934 ± 0.013 b（n = 60）	0.966 ± 0.010 ab（n = 52）
羽化率 Emergence（%）	73.3 ± 6.9 a（n = 6）	83.3 ± 5.3 a（n = 6）	72.5 ± 5.3 a（n = 6）	67.8 ± 6.6 a（n = 9）	81.1 ± 4.2 a（n = 9）	71.7 ± 5.1 a（n = 9）
雌虫比例♀（%）	56.1 ± 7.9 a（n = 6）	57.9 ± 5.6 a（n = 6）	50.0 ± 3.7 a（n = 6）	52.0 ± 5.7 a（n = 9）	50.9 ± 4.5 a（n = 9）	54.9 ± 5.7 a（n = 9）
短翅率 Brachypterous（%）						
♀	100.0 a（n = 6）	100.0 a（n = 6）	100.0 a（n = 6）	43.7 ± 9.1 a（n = 9）	14.1 ± 4.6 b（n = 9）	40.6 ± 7.4 a（n = 9）
♂	95.8 ± 2.6 a（n = 6）	100.0 a（n = 6）	90.3 ± 6.2 a（n = 6）	0.0 a（n = 9）	0.0 a（n = 9）	0.0 a（n = 9）

表中数据是平均值 ± 标准误；三个水稻品系间，数据后有相同字母者表示差异不显著（新复极差法，$P > 0.05$）；除注明外，下同。

Data in the table indicate mean ± *SE* and those followed by the same letter show no significant difference among three rice lines（$P > 0.05$）by Duncan's multiple range test. The same for the following table and figures except indicated otherwise.

表2 转基因水稻MSA和MSB对褐飞虱和白背飞虱成虫繁殖的影响

Table 2 Effects of transgenic rices MSA and MSB on reproduction of adult *N. lugens* and *S. furcifera*

参数 Parameter	褐飞虱 *N. lugens*			白背飞虱 *S. furcifera*		
	MSA	MSB	MH86（CK）	MSA	MSB	MH86（CK）
每雌产卵量 Number of eggs laid per female	270.9 ± 26.4 a（n = 12）	207.6 ± 41.7 a（n = 11）	321.3 ± 45.6 a（n = 11）	27.0 ± 8.3 a（n = 11）	20.4 ± 4.9 a（n = 12）	38.1 ± 11.3 a（n = 11）
每雌所产卵块数 Number of egg clusters laid per female	30.7 ± 3.5 a（n = 12）	19.9 ± 3.9 a（n = 11）	25.1 ± 3.2 a（n = 11）	4.5 ± 1.2 a（n = 11）	3.5 ± 0.9 a（n = 12）	7.0 ± 1.7 a（n = 11）
受精率（%） Fertilization rate	83.2 ± 5.8 a（n = 12）	89.8 ± 3.7 a（n = 8）	84.6 ± 4.2 a（n = 11）	83.7 ± 5.6 a（n = 11）	82.5 ± 8.1 a（n = 12）	81.0 ± 7.5 a（n = 11）

2.3 转基因水稻对两种飞虱子代数量和发育的影响

与亲本对照MH86相比，转基因水稻MSA和MSB对两种飞虱单雌繁殖的子代数量（图1：A，B）及其发育进度（图1：C，D）均无显著影响（$P > 0.05$）。

2.4 转基因水稻对两种飞虱寄主选择行为的影响

2.4.1 若虫的寄主选择：褐飞虱若虫在接虫12 h内较多地趋向转基因水稻MSA和MSB，且与亲本对照MH86差异显著（$P < 0.05$），而24 h后则趋性差异不明显（图2：A）。白背飞虱与褐飞虱有所不同，整个观察期内试虫均较多地趋向两种转基因水稻，与亲本对照MH86差异显著（$P < 0.05$）（图2：B）。

2.4.2 成虫的产卵选择：褐飞虱在转基因水稻MSA、MSB和对照水稻MH86上所产的卵块数与卵块大小均无显著差异（$P > 0.05$），表明它对转基因水稻没有明显喜好。白背飞虱在各水稻品系上的卵块大小虽然相似，但卵块数则以MSA和MSB上明显较多（$P < 0.05$）（图3），表明白背飞虱明显偏爱在两个转基因水稻品系上产卵。

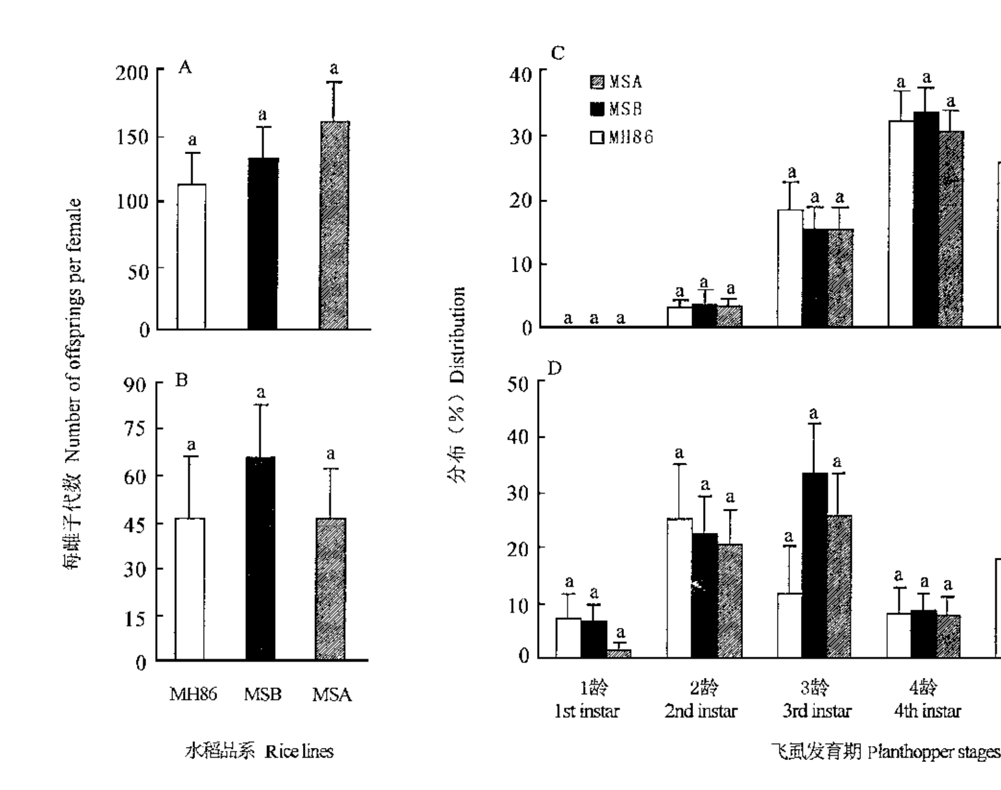


图1 转基因水稻MSA和MSB对褐飞虱和白背飞虱单雌子代数及其发育的影响

Fig.1 Effects of transgenic rice lines MSA and MSB on number and development of offsprings per female of *N. lugens* and *S. furcifera*

A，C：褐飞虱，接成虫后第25天检查 *N. lugens*, examination after 25 days of adult in festation;
B，D：白背飞虱，接成虫后第23天检查 *S. furcifera*, examination after 23 days of adult in festation.

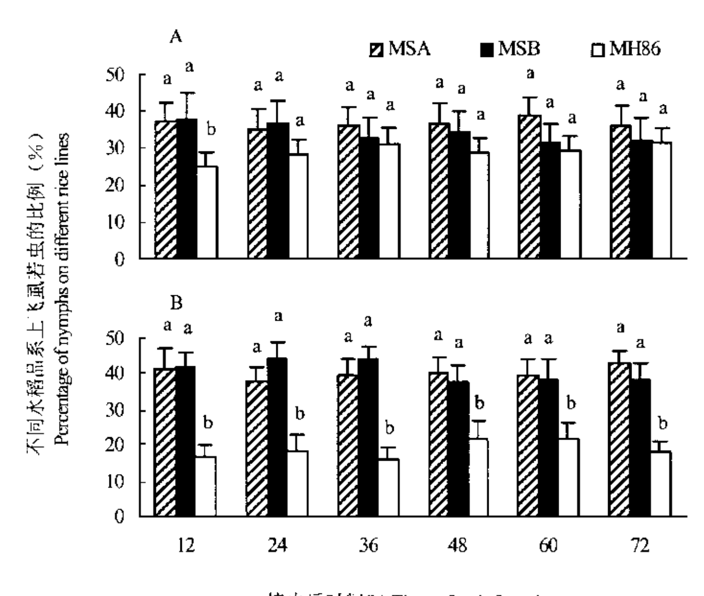
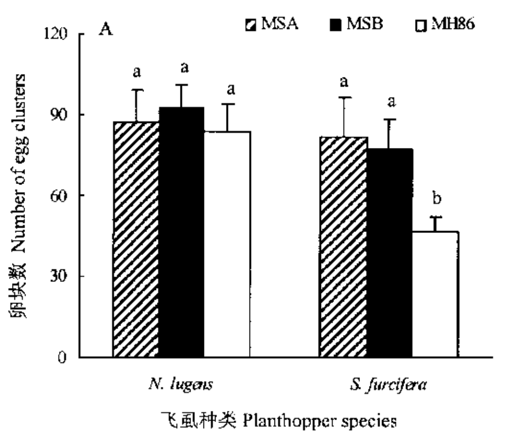


图 2　褐飞虱（A）和白背飞虱（B）若虫对不同品系水稻的选择性

Fig.2　Nymph preference of *N. lugens*（A）and *S. furcifera*（B）for different lines of rice plants



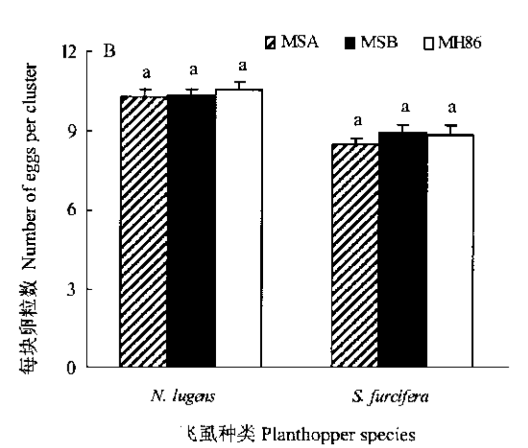


图 3　褐飞虱和白背飞虱在不同水稻品系上所产卵块数（A）及卵块大小（B）

Fig.3　Number（A）and size（B）of egg clusters laid by *N. lugens* and *S. furcifera* on different lines of rice plants

2.5　对飞虱田间种群动态的影响

试验期间，田间稻飞虱优势种为白背飞虱，其成虫占飞虱类成虫总数的比例，除 9 月 4 日仅 88.6%外，其余时间均在 95.4%以上。褐飞虱密度很低，8 月 14 日始见，占 0.01%，8 月 21 日和 8 月 31 日分别升至 0.1%和 2.6%，9 月 4 日增至 9.0%。田间还有少量灰飞虱（<2.5%）。

从田间飞虱数量动态来看（图 4），7 月 24 日开始上升，至 8 月上、中旬达高峰，该时期施药的 MSB 和 MH86 水稻上飞虱数量分别显著低于不用药的同品系水稻（$P<0.05$），之后由于台风等气象因子的影响，虫口密度迅速下降到较低的水平，且各处理间飞虱虫量无明显差异（$P>0.05$）。在 7 月 24 日至 8 月 14 日飞虱大发生期间，未用药的 MSB 与亲本 MH86 相比，飞虱量总是相对较少，降幅为 8.6%～41.3%，但仅 7 月 24 日二者的差异达到了显著水平（$P<0.05$）。

3　讨论

转基因抗虫作物对非靶标害虫的影响是生态安全性评价的重要内容。有关以鳞翅目害虫为靶标的转基因抗虫作物对非靶标同翅目害虫影响的研究，国内外已有一些报道，如 *Bt* 棉对棉蚜 *Aphis gossypii* Glover、棉叶蝉 *Empoasca biguttula* Ishida 和烟粉虱 *Bemisia tabaci* Gennaolius 等非靶标害虫影响的研究（Wilson *et al*.，1992；沈晋良，1998；崔金杰和夏敬

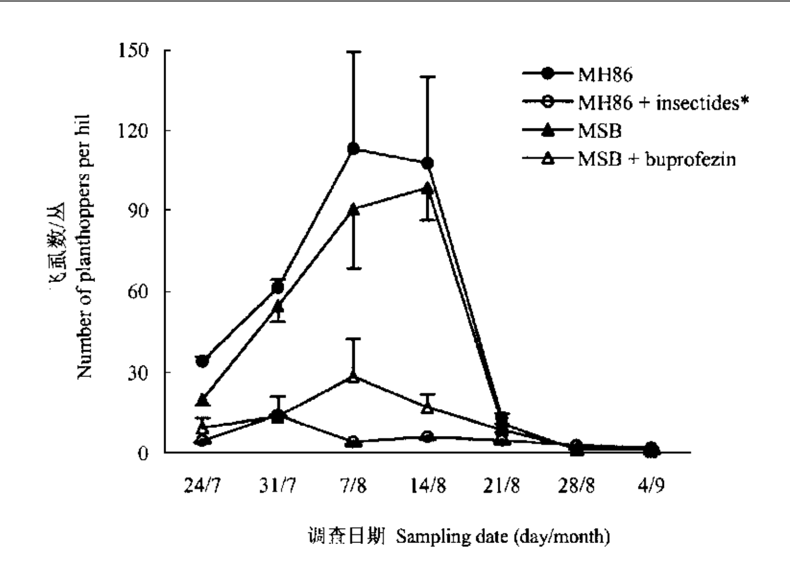


图 4 转基因水稻 MSB 及其亲本 MH86 上稻飞虱的田间种群动态

Fig.4 Population dynamics of rice planthoppers on transgenic rice MSB and its parent MH86 in fields

* 包括扑虱灵、锐劲特和杀虫双三种杀虫剂 Including buprofezin，fipronil and bisultap.

源，1997，2000；邓曙东等，2003a，2003b）。就抗螟虫和稻纵卷叶螟的转基因水稻而言，有关非靶标同翅目害虫的研究仅见于 *Bt* 水稻。Bernal 等（2002）研究了 5 种启动子不同的 *Bt* 水稻对褐飞虱的影响，发现在含 CaMV35S 或 trpA 启动子的转基因水稻上，褐飞虱排泄的蜜露含有 *Bt* 毒蛋白，指出该虫虽摄入并接触到了 *Bt* 毒蛋白，但对其生长发育没有明显影响。陈茂等（2003）通过田间调查发现，白背飞虱和黑尾叶蝉从转 *cry*1*Ab*/*cry*1*Ac* 基因水稻 TT9-3 或 TT9-4 稻区扩散到亲本 IR72 稻区的数量显著多于由 IR72 稻区扩散到 TT9-3 或 TT9-4 稻区的数量。刘志诚等（2002）对这两种害虫的田间种群动态调查表明，尽管 TT9-3 上的若虫密度显著高于其亲本 IR72 上的，但 TT9-3 与 IR72 的成虫密度间、TT9-4 与 IR72 的若虫及成虫密度间均无显著差异。以往工作未能同时从室内试验和田间发生动态两个方面对非靶标害虫进行研究，有关转基因水稻上非靶标害虫生态风险的认识尚不够深入。本研究通过室内测定和田间观察就转 *SCK* + *cry*1*Ac* 双基因的抗虫水稻对非靶标害虫稻飞虱的影响进行了系统研究。

室内试验表明，MSA 和 MSB 水稻并不会促进褐飞虱和白背飞虱的生长发育与繁殖，其中 MSB 还显著降低白背飞虱初羽化雌虫体重和短翅率。在近距离（株距约 8 cm）寄主选择实验中，虽然褐飞虱对转基因水稻并无明显偏好性，但白背飞虱若、成虫均对转基因水稻有明显趋性。田间稻飞虱（主要为白背飞虱）种群动态调查发现，在 MSB 与其亲本 MH86 上的密度无显著差异，表明上述白背飞虱对转基因水稻的趋性对田间种群动态的影响不明显，其原因可能有二：（1）虽有较多的白背飞虱趋向 MSB，但因 MSB 对白背飞虱的生长发育繁殖有一定抑制作用而得以抵消；（2）白背飞虱对 MSB 的趋性可能仅限于近距离，而在转基因水稻成片或按一定面积小区种植时，这种趋性的影响并不大，具体原因还需进一步探明。

避难所策略被认为是转基因水稻对靶标害虫抗性治理中一条有效途径（Cohen *et al*.，2000），将转基因水稻种子与非转基因水稻种子混合后种植是其中一个较简易可行的方法。具体到 MSA 和 MSB 而言，若采用该策略延缓对靶标害虫螟虫和稻纵卷叶螟的抗性，则应考虑非靶标害虫白背飞虱的近距离趋性对田间转基因植株的潜在影响。

已往一般认为蛋白酶抑制剂对吸食植物汁液的同翅目害虫无影响，主要是因为该类昆虫以游离氨基酸为氮素来源，不需要蛋白酶消化食物中的蛋白质以提供氮素营养。但近年的研究发现水稻等植物筛管液中也含有一定量的水溶性蛋白（Hayashi *et al*.，1993；Ichiwatari *et al*.，1995）。Lee 等（1999）则报道转 *SKTI* 基因水稻对褐飞虱表现出明显的抗虫性；Foissac 等（2002）进一步发现褐飞虱肠道存在蛋白酶活性。这些结果表明蛋白质可能是刺吸式同翅目昆虫的一个重要氮素营养来源，转胰蛋白酶抑制剂抗虫作物则可能因抑制有关蛋白质的消化和利用而影响该类害虫的正常生长发育。本研究中，除 MSB 对白背飞虱雌虫鲜重及短翅率有明显的影

响之外，含有 *SCK* 基因的 MSA 和 MSB 对两种飞虱若虫生长发育与成虫繁殖的各项指标均影响较小，看来 *SCK* 基因所表达的 CpTI 对两种飞虱的蛋白消化酶抑制作用较弱，Foissac 等（2002）证实 CpTI 对褐飞虱蛋白消化酶的抑制效率仅及 SKTI 的 1/2 ~1/4。另一种可能是蛋白质营养在两种飞虱氮素营养构成中比重较小，影响不大。此外，MSB 对白背飞虱的影响大于对褐飞虱，提示白背飞虱对 CpTI 的敏感性或对蛋白质营养的依赖程度可能与褐飞虱有所不同。值得一提的是，MSA 与 MSB 对白背飞虱的影响有所差别，可能与两种转基因水稻品系中 *SCK* 等基因的表达情况有关，相关基因表达产物的检测工作正在进行中。白背飞虱对 MSA 和 MSB 表现出的近距离趋性可能与吸引或排斥该类昆虫的稻株生化物质变化等非预期效应有关，亦需进一步研究阐明。

致谢　湖南农业大学 1999 级实习生张庭英、周瑞祥和扬州大学 1999 级实习生徐利军、陈晓勤参加部分工作，谨致谢忱。

参　考　文　献（References）

Bernal C C, Aguda R M, Cohen M B, 2002. Effect of rice lines transformed with *Bacillus thuringiensis* toxin genes on the brown planthopper and its predator *Cyrtorhinus lividipennis*. *Entomol. Exp. Appl.*, 102: 21 – 28.

Cohen M B, Gould F, Bentur J S, 2000. *Bt* rice: practical steps to sustainable use. *International Rice Research Notes* (*IRRN*), 25 (2): 4 – 10.

Chen M, Ye G Y, Hu C, Tu J, Datta S K, 2003. Effect of transgenic *Bt* rice on dispersal of planthoppers and leafhoppers as well as their egg parasitic wasps. *Journal of Zhejiang University* (*Agri. & Life Sci.*). 29: 29 – 33. [陈茂，叶恭银，胡萃，Tu J，Datta S K，2003. *Bt* 水稻对飞虱和叶蝉及其卵寄生蜂扩散规律的影响. 浙江大学学报（农业与生命科学版），29: 29 – 33]

Cui J J, Xia J Y, 1997. Effects of transgenic *Bt* cotton on population dynamics of the main pests and their natural enemies. *Acta Agricultural Universitatis Henanensis*, 31: 351 – 356. [崔金杰，夏敬源，1997. 转 *Bt* 棉对棉田主要害虫及其天敌种群消长的影响. 河南农业大学学报，31: 351 – 356]

Cui J J, Xia J Y, 2000. Effects of transgenic *Bt* cotton R93-6 on the insect community. *Acta Entomol. Sin.*, 43 (1): 43-51. [崔金杰，夏敬源，2000. 麦套夏播转 *Bt* 基因棉 R93-6 对昆虫群落的影响. 昆虫学报，43 (1): 43 – 51]

Deng S D, Xu J, Zhang Q W, Zhou S W, Xu G J, 2003a. Effects of transgenic *Bt* cotton on population dynamics of the non-target pests and natural enemies of pests. *Acta Entomol. Sin.*, 46 (1): 1 – 5. [邓曙东，徐静，张青文，周世文，徐冠军，2003a. 转 *Bt* 棉对非靶标害虫及害虫天敌种群动态的影响. 昆虫学报，46: 1 – 5]

Deng S D, Xu J, Zhang Q W, Zhou S W, Xu G J, 2003b. Resistance of transgenic *Bt* cotton to the cotton bollworm in cotton fields in Hubei Province. *Acta Entomol. Sin.*, 46 (5): 584 – 590. [邓曙东，徐静，张青文，周世文，徐冠军，2003b. 湖北棉区转 Bt 基因棉对棉铃虫的控制作用. 昆虫学报，46 (5): 584 – 590]

Foissac X, Edwards M G, Du J P, Gatehouse A M R, Gatehouse J A, 2002. Putative protein digestion in a sap-sucking homopteran plant pest (rice brown planthopper; *Nilaparvata lugens*: Delphacidae) — Identification of trypsin-like and cathepsin B-like proteases. *Insect Bioch. Mol.*, 32: 967 – 978.

Hayashi H, Nakamura S, Ichiwatari Y, Mori S, Chino M, 1993. Changes in the amino acid composition and protein modification in phloem sap of rice. *Plant and Soil*, 155/156: 171 – 174.

Ichiwatari Y, Honda C, Kawashima I, Nakamura S, Hirano H, Mori S, Fujiwara T, Hayashi H, Chino M, 1995. Thioredoxin-H is one of the major proteins in rice phloem sap. *Planta*, 195: 456 – 463.

Jiang X H, Zhang Q H, Hu S M, Xie S J, Xu X G, 2001. The status of pesticide resistance of rice stem borer in Zhejiang Province and their management tactics. *Plant Protection Technology and Extension*, 21 (3): 27 – 29. [蒋学辉，章强华，胡仕孟，谢士杰，徐喜刚，2001. 浙江省水稻二化螟抗药性现状与治理对策. 植保技术与推广，21 (3): 27 – 29]

Lee S I, Lee S H, Koo J C, Chun H J, Lim C O, Mun J H, Song Y H, Cho M J, 1999. Soybean Kunitz trypsin inhibitor (SKTI) confers resistance to the brown planthopper (*Nilaparvata lugens* Stål) in transgenic rice. *Molecular Breeding*, 5: 1 – 9.

Liu Z C, Ye G Y, Hu C, Datta S K, 2002. Effects of *Bt* transgenic rice on population dynamics of main non-target insect pests and dominant spider species in rice paddies. *Acta Phytophylacica Sinica*, 29: 138 – 144. [刘志诚，叶恭银，胡萃，Datta S K，2002. *Bt* 水稻对主要非靶标害虫和蜘蛛优势种田间种群动态的影响. 植物保护学报，29: 138 – 144]

Shelton A M, Zhao J Z, Roush R T, 2002. Economic, ecological, food safety, and social consequences of the deployment of *Bt* transgenic plants. *Annu. Rev. Entomol.*, 47: 845 – 881.

Shen J L, Zhou W J, Wu Y D, Lin X W, 1998. Early resistance of *Helicoverpa armigera* (Hübner) to *Bacillus thuringiensis* and its relation to the effect of transgenic cotton lines expressing *Bt* toxin on the insect. *Acta Entomol. Sin.*, 41 (1): 8 – 14. [沈晋良，周威君，吴益东，林祥文，1998. 棉铃虫对 Bt 生物农药早期抗性及与转 *Bt* 基因棉抗虫性的关系. 昆虫学报，41 (1): 8 – 14]

Tang J, Yang B J, Jiang Y N, Ye G Y, Shu Q Y, 2000. Preliminary study on *Trips oryzae* virulence to *Bt* gene transformed rice Kemingdao 2. *Chinese J. Rice Science*, 14: 241 – 242. [唐健，杨保军，蒋跃南，叶恭银，舒庆尧，2000. 稻蓟马危害转 *Bt* 基因水稻克螟稻 2 号研究初报. 中国水稻科学，14: 241 – 242]

Tang Q Y, Feng M G, 2002. DPS Data Processing System for Practical Statistics. Beijing: Science Press. 43 – 140. [唐启义，冯明光，2002. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统. 北京：科学出版社. 43 – 140]

Wilson F D, Flint H M, Deaton W R, Fischhoff D A, Perlak F J, Armstrong

T A，Fuchs R L，Berberich S A，Parks N J，Stapp B R，1992．Resistance of cotton lines containing a *Bacillus thuringiensis* toxin to pink bollworm and other insects．*J*．*Econ*．*Entomol*．，85：1 516 – 1 521．

Ye G Y，Shu Q Y，Yao H W，Cui H R，Cheng X Y，Hu C，Xia Y W，Gao M W，Altosaar I，2001．Field evaluation of resistance of transgenic rice containing a synthetic *cry*1*Ab* gene from *Bacillus thuringiensis* Berliner to two stem borers．*J*．*Econ*．*Entomol*．，94：271 – 276．

Zhu Z，2001．Research and development of highly insect-resistant transgenic rice．*Journal of Chinese Academy of Sciences*，16：353 – 358．［朱祯，2001，高效抗虫转基因水稻的研究与开发．中国科学院院刊，16：353 – 358］